

博士論文（要約）



歩行障害患者の歩行運動解析

指導教員 浅間 一 教授

東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻

学生証番号 37-137036

石川 雄己



日常生活において、関節に疾患を抱えるもしくは脳、脊椎や末梢神経に損傷を受けることによって歩行障害が引き起こされると、患者の生活の質は著しく低下する。したがって、歩行障害を可能な限り起こさないように防ぐこと、歩行障害の悪化の進行を遅らせることや、歩行障害が起こってしまった後に回復させることは非常に重要である。関節の疾患の中でも変形性膝関節症は有病者数も多く、社会的に問題となっている。

歩行障害の進行を遅らせるためには、早期に診断して適切な治療を行うことが重要である。そのために健常者と患者を識別する手法の様々な研究が行われてきた。しかし、患者の症状の特徴にばらつきが大きいため、疾患の特徴に合わせて手法を工夫する必要がある。一般的に関節の疾患に対しては、特定の関節の動作に着目した指標を用いた識別手法が多く、歩行を適切に行っているかどうかを総合的に判断する指標は使われてこなかった。そこで本研究では複数関節の動作を用いて総合的に判断できる指標を導入する。特に膝関節のように1つの関節にのみ疾患を抱える場合だけでなく、下肢の別の関節に疾患を抱える場合においても適用でき、患者の特徴を分類できる指標を見つけることを試みる。また、変形性膝関節症は発症メカニズムに不明な点が多く、機序が明らかとなっていない。そこで、疾患の悪化プロセスに関わるとされる機械的ストレスに着目してシミュレーションを行い、変形性膝関節症発症メカニズムの解明を試みる。

歩行障害が起こった患者に対してはリハビリテーションを通して歩行機能を改善することが重要である。関節の疾患においては手術を行うことで機能改善を図る場合があるが、術後に歩行機能を回復させるためにもリハビリテーションは必要である。したがって、リハビリテーションの効果を確認するために、術後患者に対しても歩行を適切に行っているかどうかを総合的に判断する指標が必要である。一方、脳卒中罹患後には片麻痺を有することが多く、片麻痺患者に対しては歩行機能を再獲得するためにリハビリテーションを行う。近年、歩行アシストロボットを用いたリハビリテーションが導入されているが、現状ではこの新しいリハビリテーション手法はどのように行えば効果的か理解が広まっていない。そこで、本研究では歩行アシストロボットを使いこなしている熟練者の手法を再現し、歩行アシストロボットの効果的利用を伝承できる形式知化を試みる。

本研究の目的は、複数関節の動作を用いて総合的に歩行機能を判断できる指標を見つけ、実際の患者の歩行に適用すること、筋骨格シミュレーションモデルを生成し、個体差が膝関節靭帯張力に与える影響を調べることと、歩行アシストロボットを用いた片麻痺患者リハビリテーション技能の抽出を行うことである。上記の事項を達成するために、本研究において以下の4つの目的を設定する。

- 変形性膝関節症患者の歩行を解析し、Elevation angle を用いた解析手法の有効性を調べること。
- アキレス腱延長術を適用した尖足患者の歩行を解析し、Elevation angle を用いた解析手法の有効性を調べること。
- 膝靭帯モデルを用いたシミュレーションを行い、個体差が膝関節靭帯張力に与える影響を調べること。
- 片麻痺患者の歩行を分析し、歩行アシストロボットを用いたリハビリテーションの理学療法士の熟練者技能を再現すること。

本論文は全6章から構成される。第1章の序論では、研究背景と目的を述べる。第2章の関連研究では、歩行解析手法や各疾患を有する患者の歩行解析の既存研究を確認するとともに、本研究の位置づけを述べる。第3章では、関節に疾患を有する症例である変形性膝関節症患者と尖足術後患者に Elevation angle を用いた歩行解析手法を適用した計測実験を述べる。第4章では、解剖学的特徴を有する膝靭帯モデルを作成し、逆動力学計算を行い、明らかになった内反外反歩行と靭帯張力との関係を述べる。第5章では、歩行アシストロボットリハビリテーションの熟練者へのインタビューと片麻痺患者の歩行分析を通して、リハビリテーション技能の抽出を行う。第6章の結論では、本研究全体の貢献を確認し、今後の展望を述べる。

第3章では、Elevation angle を用いた歩行解析手法の確立を行う。関節に疾患を有する症例に対して Elevation angle を用いた歩行解析手法を適用した結果を示す。調べる対象は、変形性膝関節症患者の歩行とアキレス腱延長術を適用した尖足患者の歩行である。変形性膝関節症患者の歩行では、導入した Elevation angle を用いた歩行解析手法を用いて患者と健常者を識別できるかを調べた。その結果、第1主成分と第2主成分の累積寄与率が0.98を超えているという結果から、変形性膝関節症患者の歩行においても平面法則が成立することが示された。また、主成分ベクトルの角度差を用いることで健常高齢者と患者を識別することができることが交差検定とROC解析によって示された。また、第1主成分ベクトルと第2主

成分ベクトルの傾きを用いて患者のタイプ別分類を行った。タイプ別の患者は異なる種類の歩容を有しており、患者の特徴を詳細に分けて分析した。

アキレス腱延長術を適用した尖足患者の歩行でも、Elevation angle を用いた歩行解析手法を用いて、術後経過を定量的に評価した。その結果、第 1 主成分と第 2 主成分の累積寄与率が 0.98 を超えているという結果から、術後の尖足患者の歩行においても平面法則が成立することが示された。また、主成分ベクトルの角度差を用いることで、リハビリテーション過程において、定量的に健常者の近似平面の傾きに近づいていることを示すことができた。

第 4 章では、膝関節の靱帯に着目した筋骨格シミュレーションモデルを生成し、膝関節靱帯付着位置が靱帯張力に与える影響を調べた。このシミュレーション結果を用いて変形性膝関節症の機序を調べた。

作成したモデルは、膝関節の解剖学的特徴にしたがって、剛体リンクで表現した骨格、ばねダンパで表現した筋と関節軟骨、ひずみばねで表現した靱帯を有する。膝関節の最大の特徴である転がりと滑りが同時に起こり、回旋運動も同時に起こる点は屈曲角度ごとにその他の並進・回転方向に動くように設計し表現した。さらに荷重試験シミュレーションを用いてモデルの妥当性を調べた。靱帯切断を行って前後方向と内外転方向の荷重試験を行った結果、前後方向では前十字靱帯が制動の役割を果たしていることを確認できた。内外転方向も屍体実験結果と一致することを確認できた。屈曲角度ごとに前後・内外転・内外反の荷重試験を行った。前方ではピークを有する点で、後方では値が屈曲角度ごとに変わらない点で、内外転では 2 種類のパターンの 1 つであるピークを特定の屈曲角度で有する特徴を有するモデルが作成できた。

3 次元筋骨格靱帯膝関節モデルを用いて、歩容の個体差と膝関節構造の個体差による影響を解析した。歩容の影響を解析した結果、外反歩行では見られなかった前十字靱帯と後十字靱帯のバランスの崩れが内反歩行時に見られた。膝関節の回転軸に与える影響が大きいと見られるため、内反歩行が変形性膝関節症の発症に関わる現象であることが示唆された。靱帯付着位置の影響を解析した結果、前十字靱帯と外側側副靱帯では上下方向へ靱帯付着位置を移動させることによって張力が大きく変化することが示された。また、歩容によって起こった変化と靱帯付着位置による変化が加わることによって、正常および標準の状態に比べて影響が大きいことを示した。

第 5 章では、片麻痺患者への歩行アシストロボットリハビリテーションの熟練者技能の抽

出を行った。手法としては、熟練者へのインタビューと動画を用いた片麻痺患者の歩行分析を行った。インタビューにおいて、熟練者の技能が、患者のタイプ別分類を行うことが明らかとなった。そのため、これを形式知とすることを目的に、患者の歩行動画からタイプ別分類に用いられる特徴を抽出し、熟練者と同様の分類が簡便にできる分類表を構築した。

インタビューによる技能抽出の結果、歩き方を元に、患者を4タイプに分類し、リハビリ手法を選択していることが分かった。歩き方は4つの歩行フェーズに分けて考えており、各タイミングで膝が伸展しているのか屈曲しているのか、体幹が前に出ているか後ろに残っているかなど、どこに課題があるかで判断していることが分かった。この結果、患者は両脚立脚期（荷重応答）、単脚立脚期（立脚終期）、両脚立脚期（前遊脚期）、遊脚期（遊脚終期）に課題を持つタイプに分類していることが分かった。

患者の歩行動画からタイプ別分類に用いられる特徴を抽出した。結果、歩幅と立脚期の時間で分類することで、熟練者のタイプ分類を再現できることが示された。これらをまとめて、タイプ別患者の分類表を得ることができた。

第6章の結論では、本研究全体の貢献を確認し、今後の展望を述べた。